유기섬유의 용융 및 기화에 따른 초고강도 콘크리트의 폭렬 특성 평가

김규용¹⁾ · 최경철¹⁾ · 이주하²⁾ · 이승훈²⁾ · 이태규^{1)*}

¹⁾충남대학교 건축공학과 ²⁾삼성물산(주) 건설부문

Evaluation on Spalling Properties of Ultra High Strength Concrete with Melting and Vaporization of Fiber

Gyu-Yong Kim,¹⁾ Gyeong-Cheol Choe,¹⁾ Joo-Ha Lee,²⁾ Seung-Hoon Lee,²⁾ and Tae-Gyu Lee^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-742 Korea

²⁾Samsung C&T Corporation, Seoul 135-769, Korea

ABSTRACT Recently, experimental studies to prevent explosive spalling based on spalling mechanism and addition of Polypropylene fiber in high strength concrete (HSC) are performed actively. However, with respect to ultra high strength concrete (UHSC), its compact internal structure is more difficult release vapor pressure at rapid rising temperature compared to HSC. Therefore, in this study, an experiment was conducted to evaluate spalling properties of UHSC using $\square$ 100 mm $\times$ 100 $\times$ H200 mm rectangular specimen according to ISO-834 standard fire curve. With respect melting point of fiber, three fiber types of Polyethylene, Polypropylene, and Nylon fibers with melting temperature of 110°C, 165°C, and 225°C, respectively, were considered. Mixed fiber of 0.15% and 0.25% of concrete volume was used to consider spalling properties based on water vapor pressure release. Then, TG-DTA test on fiber and FEM analysis were performed. The results showed that it is difficult to prevent initial spalling without loss of fiber mass even if fiber melting temperature is low. Also, in preventing thermal spalling, fiber that melts to rapidly create porosity within 10 minutes of fire is more effective than that of low melting temperature property of fiber.

Keywords : spalling mechanism, prevent explosive spalling, water vapor pressure, melting point, initial spalling

1. 서 론

고강도 콘크리트의 폭렬현상에 관한 원인에 관해서는 많은 학자들에 의하여 그 연구가 진행되고 있고, 그 메커니즘에 관해서도 다양한 해석 방법에 의하여 제안되고 있다. 이러한 폭렬의 메커니즘에 관한 연구 동향으로는 콘크리트 내부의 수분이동에 따른 내부압력의 변화,^{1,4)} 다양한 재료의 열적 특성에 의해 유발되는 열응력을 받아 콘크리트의 매트릭스가 붕괴된다는 이론⁵⁻⁸⁾이 구체적인 데이터를 바탕으로 보고되고 있다.

또한 고강도 콘크리트의 폭렬현상에 관한 메커니즘의 연구와 더불어 폭렬을 방지하고 화재 시에 콘크리트 구조물의 안전성을 확보할 수 있는 방법에 관해서도 연구가 빠르게 진행되고 있다. 폭렬 방지 공법에 있어서는 다양한 방법들이 제안되고 있고, 그 중에서는 섬유혼입에 의한 콘크리트의 수증기압을 낮추는 방법이 선호되고 있는 실정이며, 국가적인 차원에서 설계기준으로 제정

된 사례도 존재한다.⁹⁻¹⁵⁾

실제로 유로코드(Euro code)에서는 고강도 콘크리트의 폭렬을 방지하기 위해서 콘크리트에 단일 형태의 폴리프로필렌섬유(이하, PP섬유) 2.0 kg 이상을 혼입하도록 제안하고 있다.

국내의 선행연구에서도 100 MPa 이하의 콘크리트에 있어서 1 m³당 PP섬유를 0.2vol%(약 1.8 kg)으로 혼입할 경우 폭렬을 효과적으로 방지할 수 있다고 보고되고 있다.¹⁶⁾

한편 이러한 섬유혼입에 따른 내부수증기압의 해소는 주로 Fig. 1에 나타난 바와 같이 용융점이 낮은 섬유가 유리한 것으로 보고되고 있지만 실제로 빠르게 온도가 상승하는 경우에는 콘크리트의 열용량이 크기 때문에 충분히 섬유의 용융에 따른 내부공극의 네트워크를 형성하지 못할 수 있는 점도 존재할 수 있다. Pierre Kalifa의 연구^{1,15)}에 따르면 압축강도 100 MPa 콘크리트에 있어서 PP섬유를 약 2.0 kg/m³을 혼입하게 되면 충분히 폭렬을 방지할 수 있다고 판단하였고, 혼입된 섬유주위에 발생되는 마이크로 크랙의 활성화에 따라 공극 네트워크가 형성되는 것을 구명하였다. 하지만 섬유의 용융점에 도달되기까지의 시간 즉 80°C~200°C의 온도 범위에서 섬유의 효과는 미치지 못하는 것으로 판단하였다. 수증기

*Corresponding author E-mail: ninga777@naver.com

Received December 30, 2011, Revised February 17, 2012,

Accepted March 2, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

Fig. 1 DT and TGA of fiber, melting, vapor, and burning point

압과 섬유용융에 따른 내부압력의 관계는 밝혀졌지만 마이크로크랙의 활성 현상에 관해서는 충분한 설명이 어렵다고 제시하였다.

하지만 이 연구 결과에 있어서는 가열 속도가 1°C/min의 낮은 온도에서 평가함으로써 내부온도가 천천히 가열됨에 따라 내부균열이 발생할 수 있고, 급격하게 온도가 상승하는 경우에 있어서 폭발 및 급격한 수증기 팽창압을 고려할 수 없다는 점을 들 수 있다. 실제 급격한 온도상승이 수반될 경우 내부온도는 다양한 온도분포를 나타내게 되고 균열패턴, 수증기의 형성시간 등에 큰 차이가 발생할 수 있기 때문이다. 따라서 섬유의 용융과 폭발의 상관관계를 파악하기 위해서는 실제 화재조건을 상정하여 내부온도분포 성장과 섬유의 용융 과정을 명확하게 분석할 필요가 있다.

따라서 이 연구에서는 선행연구를 바탕으로 섬유의 용융과 폭발의 상관관계를 분석하기 위하여 초고강도 콘크리트를 대상으로 섬유용융점에 따른 폭발 성상을 평가하였다. 또한 콘크리트 내부온도 상승조건에 따라 섬유의 용융에 따른 내부공극을 해석적으로 분석하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 계획

이 연구에서는 Table 1에 나타난 바와 같이 섬유의 용융과 폭발의 상관관계를 분석하기 위하여 초고강도 콘

크리트의 W/B는 12.5%로 설정하였으며, 현장조건을 고려하여 충분한 작업성을 갖기 위하여 슬럼프 플로우는 750 ± 100 mm를 만족하도록 하였다. 고강도 콘크리트에 사용된 섬유는 용융점을 고려하여 PE섬유, PP섬유, 나일론섬유 3종류로 설정하고, 기존 연구자료를 참고하여 섬유의 혼입률은 0, 0.15, 0.25vol%를 혼입하였다.

가열방식은 ISO-834 표준가열곡선에 의하여 50분간 가열하였으며, 평가 항목으로는 섬유의 용융점과 혼입률에 따른 초고강도 콘크리트의 폭발 특성, 가열중 열팽창 변형, 중량손실률, 온도분포해석에 따른 섬유손실률 등을 평가하였다.

2.2 사용 재료

이 연구에서 사용한 재료는 Table 2에 나타난 바와 같이 시멘트는 분말도 $3,200 \text{ cm}^2/\text{g}$ 및 밀도 3.15 g/cm^3 의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 혼화제는 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용하였다. 잔골재는 천연잔골재로서 밀도 2.65 g/cm^3 , 흡수율 1.00%의 세척사를

Table 2 Physical properties of used material

Material		Physical properties
Cement		OPC (density: 3.15 g/cm^3 , specific surface area: $3,200 \text{ cm}^2/\text{g}$)
Fine aggregate		Sea sand (density: 2.65 g/cm^3 , absorption: 1.00%)
Coarse aggregate		Crushed granitic aggregate (size: 13 mm, density: 2.70 g/cm^3 , absorption: 0.9%)
Silica fume		Density: 2.5 g/cm^3 Specific surface area: $200,000 \text{ cm}^2/\text{g}$
Blast furnace slag powder		Density: 2.9 g/cm^3 Specific surface area: $6,000 \text{ cm}^2/\text{g}$
Gypsum		Density: 2.9 g/cm^3 Specific surface area: $3,550 \text{ cm}^2/\text{g}$
Fiber	Poly ethylene	Diameter: 12 μm , length: 12 mm Density: 0.91 g/cm^3 , melting temp.: 110°C
	Poly propylene	Diameter: 20, 40 μm , length: 12 mm Density: 0.91 g/cm^3 , melting temp.: 165°C
	Nylon	Diameter: 20, 40 μm , length: 12 mm Density: 1.1 g/cm^3 , melting temp.: 225°C
Super plasticizer		Polycarboxylic-based super plasticizer

Table 1 Experimental plan and concrete mix proportion

W/B (%)	Slump-flow (mm)	Air (%)	S/a (%)	Used fiber	Fiber contents (vol%)	Heating curve (°C)	Unit weight (kg/m ³)							Test item
							W	C	BFS	SF	Gy ⁽²⁾	S	G	
12.5	750 ± 100	2 ± 1	35	PE ⁽¹⁾	0.0	ISO-834 standard fire curve	150	660	240	240	60	389	736	Spalling properties
				PP	0.15									Thermal strain
				NY	0.25									Weight loss (wt.%)
														Water vapor pressure (kPa)

⁽¹⁾PE: polyethylene fiber, PP: polypropylene fiber, NY: nylon fiber, ⁽²⁾Gy : gypsum

사용하였고, 굽은골재는 밀도 2.70 g/cm^3 , 흡수율 0.9% 및 최대치수 13 mm의 화강암류 부순 자갈을 사용하였다.

또한 사용된 섬유는 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 나일론으로써 각각의 용융점은 110°C , 165°C , 225°C 이며, 섬유의 직경은 폴리에틸렌($12 \mu\text{m}$)을 제외하고 $20 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$ 로 하였고 길이는 12 mm로 설정하였다.

2.3 시험체 제작 및 양생

압축강도 확인용 시험체는 $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$, 폭렬 특성을 평가하기 위한 시험체는 폭렬 특성은 각형 형태가 평가에 용이하여 $\square 100 \times 200 \text{ mm}$ 크기로 제작하였으며, 탈형 후 7일간 수증양생을 실시하였으며, 콘크리트의 이후 내부습수조건을 동일하게 유지하게 위하여 $20 \pm 3^\circ\text{C}$, R.H. $50 \pm 5\%$ 의 항온항습실내에서 재령 56일까지 기건 양생을 실시하였다. 시험은 56일후 평가하였고 압축강도의 발현은 206 MPa로 확인되었다.

2.4 시험 방법

2.4.1 가열 장치 및 가열 방법

이 연구의 가열재하 실험을 위한 장치는 Fig. 2와 같

Fig. 2 Loading and heating machine

Fig. 3 Heating curve

은 2,000 kN급 UTM 재하장치에 전기 가열로를 설치하였으며, 가열로는 강제 프레임을 사용하여 기존의 재하장치와 결합하였다.

콘크리트 시험체의 변형은 가력판 상하부 및 냉각기 중심에 15 mm의 공간을 통해 석영관을 설치하고, 시험체 반대쪽의 석영관 끝에 변형률 게이지(변위계)를 설치하여 공시체의 변형을 측정하였다. 변위계의 용량은 최대 5 mm이며, 시험 중의 기록은 데이터로거를 사용하여 1초 간격으로 기록하였다. 시험체의 가열은 Fig. 3과 같이 ISO-834 표준가열곡선에 따라 60분간 비재하 시험하되 이 실험에서는 시험체를 고정을 목적으로 0.2 kN 가력한 후 가열 시험을 실시하여 폭렬 특성 및 변형 특성을 평가하였다. 가열온도 조절은 열전대에 의해 입력되는 시험체의 온도데이터에 위치한 전기히터의 온도를 제어하는 컨트롤 기능과 시간과 온도변동의 관계를 프로그램화하여 ISO-834 표준가열곡선의 구현이 가능하도록 하였다.

2.4.2 수증기 팽창압 측정 방법

Fig. 4는 압력측정방법의 개요를 나타낸 것으로 압력관의 매입은 고온을 받을 경우 수증기의 포화점이 30~50 mm에서 형성되었던 기존 연구를 바탕으로 수증기압이 발생할 경우 외부로 반출될 수 있는 것과 더불어 온도의 영향을 배제하기 위하여 원통형의 SUS관을 사용하였다. 또한 콘크리트 타설시 골재 및 페이스트의 유입을 방지하기위해서 압력관 입구를 양초로 마감하였다.

시험에 사용된 수증기압 측정기기는 매설된 관과 압력 측정 센서의 선단부를 커플러로 체결하여 수증기압의 누출을 방지하였다. 사용된 압력측정 센서는 사전에 예비 실험을 통하여 수증기온도를 고려하여 150°C 의 온도에

Fig. 4 Evaluation of water vapor pressure

서 측정할 수 있는 고온용 압력계를 사용하였으며 측정 압력의 범위는 20 MPa이다. 수증기압의 측정 방법은 가열시 매입된 관을 통하여 수증기가 외부로 전달되고 고온용 압력계로 측정, 데이터로거를 사용하여 1초 간격으로 기록하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 초고강도 콘크리트의 폭렬 성상

섬유의 용융점과 혼입률에 따른 초고강도 콘크리트의 폭렬의 성상을 평가해보고자 실험을 수행하였으며 그 결과는 Table 2와 같다. 콘크리트의 압축강도는 측정재령 56일에 200 MPa을 약간 상회하였고, 측정재령은 56일로써 내부함수율은 평균 3%로 이하로 측정되었다.

폭렬 성상 평가 결과는 섬유혼입률 0.15vol%를 혼입한 경우 전체적으로 폭렬이 발생하였지만 PP 및 나일론섬유를 혼입한 경우 형태의 유지 또는 박리폭렬 정도였다. 섬유혼입률 0.25vol%에 있어서도 PE섬유의 경우 극심한 폭렬현상으로 인하여 완파되었지만 PP섬유의 경우는 박리폭렬, 나일론섬유의 경우는 폭렬이 발생하지 않았다.

전체적인 실험 결과를 정리하여 보면, 섬유의 용융점은 PE섬유(110°C, 실측치는 157°C) > PP섬유(165°C, 실측치는 167°C), 나일론섬유(225°C, 실측치는 220°C)의 분석 결과를 나타냈지만, 실제 초고강도 콘크리트에 적용시

폭렬 성상은 동일 혼입률 조건에서 나일론 > PP > PE섬유의 순서로 나타났다. 이는 용융점이 낮은 섬유가 고강도 콘크리트의 폭렬방지에 다소 유리하다고 보고된 것과 상이한 결과로써 초고강도 범위에서 세밀한 분석이 필요할 것으로 확인되었다. 또한 초기 폭렬의 발생에 있어서 온도 분포에 따른 섬유의 용융량을 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3.2 열팽창 변형과 중량손실률

폭렬시험 중 가열온도 따른 열팽창변형을 Fig. 5에 나타냈다. 열팽창 변형의 패턴은 폭렬이 발생, 경미한 박리 또는 폭렬이 발생하지 않은 경우로 구분할 수 있다. 폭렬이 발생한 plain, PE_D12_0.15vol%, PE_D12_0.25vol%의 경우에 있어서 섬유혼입조건과 상관없이 온도에 따라 열팽창변형이 서서히 증가하다가 7~10분 사이에서 폭렬이 발생함과 동시에 충격력에 의하여 급격한 떨림 현상이 발생하였다. 또한 지속적인 폭렬현상에 기인하여

Table 3 Spalling of UHSC with fiber mixed

W/B	Fiber		PE fiber (D12 μm)	PP fiber	NY fiber
	Mixed volume (vol%)	Diameter (μm)			
0.15	0.15	20
		40
	0.25	20
		40

(a) Case of major spalling and failure

(b) Case of minor and non-spalling

Fig. 5 Thermal strain of temperature

Fig. 6 Mass loss of concrete with spalling

800°C 이상의 고온에 있어서 수축현상이 발생되며, 이때의 변형률은 0.002로 나타났다.

경미한 박리 또는 폭렬이 발생하지 않는 경우는 섬유 혼입률 0.25vol%로서 변형률이 지속적으로 증가하며, 직경이 작을수록 열팽창변형은 증가하는 경향을 나타냈다. 직경이 작은 섬유는 수증기압의 통로로서 폭렬을 효과적으로 저감하는 것이 가능하지만 내부의 균열 발생 또는 열응력 등은 크게 작용하는 것으로 판단되었다. 또한 섬유의 종류에 있어서는 PP섬유를 혼입하는 경우, 나일론 섬유를 혼입한 콘크리트에 비해 열팽창응력이 다소 상승되는 것으로 확인되었다.

Fig. 6은 섬유혼입조건에 따른 중량손실률을 나타낸 것으로 기존연구와 동일하게 초고강도 콘크리트에서도 섬유혼입률이 증가할수록 폭렬로 인한 단면손실이 감소하여 중량손실률이 저하하는 것으로 나타났고, 섬유직경이 작은 섬유가 유리한 것으로 확인되었다.

또한 섬유 종류에 있어서는 plain ≥ PE섬유 > 나일론섬유 > PP섬유의 순으로 나타났으며, 부분 폭렬에 의하여 표면부가 파손된 경우에도 전체 콘크리트 중량의 20% 이하로서 동일 혼입률 조건에서도 용융점에 대한 영향은 크지 않는 것으로 확인되었다. 따라서 통상적인 용융점에 따른 폭렬 저감현상에 관해서 PE섬유의 경우 동일 혼입률 조건에서 단위체적당 개체수가 PP 및 나일론섬유에 비하여 크고, 용융점이 낮음에도 불구하고 폭렬현상이 크게 발생된 것을 분석해 볼 때 초기 폭렬 조건과 연속적인 장기 폭렬의 관점에서 온도 상승에 따른 콘크리트 깊이별 섬유 용융량을 분석해볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

3.3 섬유혼입조건에 따른 수증기 팽창압

실제 초고강도 콘크리트에 적용 시 동일 혼입률 조건에서 폭렬 성상을 평가한 결과, 나일론>PP>PE섬유의 순

(a) Case of major spalling and failure

(b) Case of minor spalling

(c) Case of non-spalling

Fig. 7 Water vapor pressure of UHSC with fiber mixed (W/B 12.5)

서로 나타났다. 이는 기존 연구에 따른 이론체계와 상이한 것으로 그에 대한 원인을 분석하기 위해 내부수증기 팽창압을 평가하였다.

Fig. 7은 ISO-834표준가열곡선에 의해 가열시 섬유혼입에 따른 초고강도 콘크리트의 수증기 팽창압을 나타낸 것이다. 섬유혼입에 따른 전반적인 경향은 표면 30 mm에서의 압력은 폭렬이 발생하는 경우 10~20분 사이의 수증기 팽창압의 최대점이 섬유 혼입률이 증가함에 따라 20~30분으로 변화하면서 폭렬이 방지되는 것으로 확인되었다. 따라서 폭렬상태에 따라 수증기 팽창압의 패턴은 크게 3가지 단계로 나누어 볼 수 있다.

- ① 파괴 폭렬이 발생하는 경우
- ② 부분 폭렬이 발생하는 경우
- ③ 폭렬이 발생하지 않는 경우

초기부터 지속적으로 폭렬이 발생되어 파괴가 일어나는 경우는 plain 및 PE섬유를 혼입하는 경우로써 plain 시험체의 경우 가열 후 6분(637°C)에서 폭렬이 발생하였으며 표면에서 30 mm에서의 압력은 초기 폭렬 시점에서 43.2 kPa로 측정되었고 지속적으로 폭렬이 발생하여 단면 손실이 급격하게 이루어져 수증기압의 형성이 어려운 것으로 나타났다. 또한 50 mm의 위치에서는 초기 폭렬 이후 15분에서 수증기압이 형성되어 급격하게 상승되었으며, 가열 후 21분(685°C)에서 최고압력인 231.8 kPa를 기점으로 급격하게 내력이 저하하여 최종적으로 붕괴하였다.

PE섬유를 혼입하는 경우에는 섬유혼입률 0.15vol%에서 폭렬이 발생하는 시점부터 표면 30 mm의 수증기 팽창압이 형성되며 11분경 124.2 kPa의 최고압력을 보였으며, 50 mm의 위치에서는 20분에 157 kPa의 값을 나타냈다. 섬유가 0.25vol%혼입된 경우는 가열 초기에는 plain 콘크리트 시험체와 유사한 경향이였지만 섬유 혼입량이 증가할 경우, 수증기 팽창압이 낮고 30 mm 위치의 수증기 팽창압의 형성이 다소 지연되는 것을 확인하였다.

부분 폭렬이 발생하는 경우는 PP섬유와 나일론섬유를 0.15vol% 혼입한 시험체에서 나타났으며, 표면 30 mm 위치의 최대 수증기 팽창압은 10~20분의 범위에서 형성되었고 그 값은 PP섬유혼입 시험체는 144.2 kPa, 나일론 섬유혼입 시험체는 206 kPa로 나타났다. 또한 50 mm의 위치에서는 나일론 섬유혼입 시험체의 경우 약 61.8 kPa의 값이 유지되었지만, PP섬유혼입 시험체는 601 kPa의 높은 값을 보였다.

폭렬이 발생하지 않는 경우는 PP섬유 및 나일론섬유를 0.25vol% 혼입한 시험체로서 주로 초고강도 콘크리트의 폭렬이 발생하는 7~15분 사이에서는 형성되지 않았고, 가열 15분 이후의 시간에서 수증기 팽창압이 측정되었다. PP섬유 및 나일론섬유를 혼입한 시험체의 표면 30 mm의 수증기 팽창압의 형성 패턴은 유사하였으며 나일론섬유를 혼입한 시험체의 경우가 초반시간에 다소 수증기 팽창압의 값이 높게 측정되었다.

한편 표면 50 mm에서의 PP섬유와 나일론섬유를 혼입한 시험체의 수증기 팽창압의 값은 다소 상이한 경향을

나타냈다. 나일론섬유를 혼입한 시험체의 경우 12~18분까지 수증기 팽창압이 상승되다가 206 kPa의 값을 기점으로 서서히 감소하였으나, PP섬유를 혼입하는 경우 초반 20분까지는 수증기 팽창압이 형성되지 않았으며, 그 이후에 수증기 팽창압이 서서히 증가하면서 350 kPa의 값을 보였다. 따라서 섬유 종류 및 혼입률에 있어서는 초기 폭렬 시점에서는 대체적으로 유사한 값(15~30 kPa)을 나타내었으나, 50 mm에서의 압력은 PP섬유를 혼입한 시험체가 다소 높았고 섬유 혼입률이 낮을수록 콘크리트 피복 탈락에 따른 온도상승이 높아져 상회하는 경향을 나타냈다.

초고강도 콘크리트는 일반 및 고강도 콘크리트와 달리

(a) Mass loss of polyethylene fiber

(b) Mass loss of polypropylene fiber

(c) Mass loss of nylon fiber

Fig. 8 Mass loss of fiber with DTA

수증기 포화점이 표면에서 가깝게 형성되는 것으로 보고 되고 있고, 이 연구의 범위에서는 섬유 혼입률이 증가할수록 50 mm에서의 압력이 크게 측정되어 kalifa, Long, T. Phan의 연구보고와는 다른 경향으로써 초고강도 영역에서는 섬유의 혼입을 통하여 표면에 가깝게 형성되는 수증기 포화점을 콘크리트 내부로 이동시키는 역할을 하는 것으로 판단되었다. 또한 섬유의 종류 및 용융점의 영향은 동일 혼입률 조건에서 PE섬유는 용융점이 낮지만 수증기 팽창압을 완화시키지 못하였지만, 폭렬이 방지된 나일론섬유와 PP섬유를 혼입하는 경우는 나일론섬유는 초기 10~20분 사이에 발생하는 수증기 팽창압을 시험체 중심부까지 빠르게 이동시키는 효과가 있으며, PP섬유의 경우에는 20분 이상에서 수증기 팽창압을 서서히 분산시키는 효과가 있는 것으로 판단되었다.

4. 내부온도분포해석에 따른 섬유기화량 분석

4.1 온도상승에 따른 섬유의 기화량

콘크리트 내부온도에 따른 섬유 기화량을 시차열 분석한 결과는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 가열속도가 느린 경우 섬유의 기화에 따른 공극의 형성이 빠르게 형성되었다. 하지만 초기 폭렬이 시작되는 시점인 7~10분 사이에서는 실제 섬유의 용융 및 기화에 따른 공극의 형성은 이루어지지 않음을 알 수 있다. 즉 초고강도 콘크리트에 있어서는 섬유의 용융점에 이르기 전에 폭렬이 발생할 수 있다는 점과 공극의 네트워크를 형성할 수 없다는 점이 문제점으로 제시될 수 있다.

용융점에 따른 섬유의 특징에 있어서 PE섬유의 경우는 용융점은 낮지만 실제로 섬유가 녹아서 기화되는 시점은 약 255°C로 섬유의 용융패턴 나일론섬유와 유사한 거동을 보이고 있으며, 실제 폭렬이 발생하는 시점에서 공극 형성의 효과는 작을 것으로 판단되었다. 또한 유사한 용융점을 갖는 PP섬유의 경우에는 100°C~300°C의 사이에서 중량이 상승되는 현상이 발생되었고, 이는 공극의 폐쇄현상으로 직결될 수 있어 섬유 혼입률이 증가하더라도 초기 폭렬현상은 방지가 어렵다는 분석 결과를 확인했다. 단, PP섬유의 경우 10분 정도의 시간에서 급격한 기화로 인하여 공극의 형성이 유리하기 때문에 초기 폭렬 이후의 시간에 있어서는 섬유용융에 따라 효과가 있을 것으로 판단된다. 즉 내부수증기압의 측정 결과와 비교해보면 가열 15분이 경과된 시간부터 PP 섬유혼입 시험체의 압력이 증가하고 있는 점에서 섬유기화에 따른 공극 형성이 이루어짐을 확인할 수 있었다.

한편 나일론섬유의 경우 용융점은 높지만 100°C~400°C 사이에서 섬유의 중량이 감소되며, 중량 손실량은 전체 섬유량의 약 3%로 정도로서 초기에 형성되는 공극으로 인하여 타 섬유에 비하여 폭렬의 방지가 효과적임을 확인할 수 있었다. 또한 기화온도가 약 400°C 이후로써 표면 10 mm는 10분, 50 mm의 위치에서는 40분이 소요되

므로 초기시간 약 10~20분 사이에 수증기 팽창압의 최대치가 형성되는 것으로 판단된다. 따라서 섬유의 선정에 있어 용융점에 따른 효과는 무시할 수 없지만 초기 폭렬을 방지하고 효과적으로 내화성능을 확보하기 위해서는 섬유의 기화에 따른 공극 형성에 관한 고찰이 선행되어야 한다.

따라서 섬유의 용융 및 기화에 의해 발생하는 섬유손실량은 Fig. 9와 같이 300°C 이후이므로 온도 변화에 따라 식 (1)과 같이 제시할 수 있다.

$$R_f = a \cdot T^3 + b \cdot T^2 - c \cdot T + d \quad T > 300^\circ\text{C} \quad (1)$$

여기서, R_f : mass loss of fiber (%), T : temperature, a , b , c , d : coefficient

$$C_p(T) = 900(\text{J/kg} \cdot \text{T}) \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$C_p(T) = 900 + (T - 100)(\text{J/kg} \cdot \text{T}) \quad 100^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C}$$

$$C_p(T) = 900 + (T - 200)/2(\text{J/kg} \cdot \text{T}) \quad 200^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C}$$

$$C_p(T) = 1100(\text{J/kg} \cdot \text{T}) \quad 400^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C}$$

$$\lambda_c = 2 - 0.2451(T/100) + 0.0107(T/100)^2 \quad (3)$$

여기서, C_p : specific heat ($\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$), λ_c : thermal conductivity ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$), T : temperature ($^\circ\text{C}$)

Table 3 Coefficient of fiber types

Fiber type	a	b	c	d
Polypropylene	-3.2×10^{-7}	4.0×10^{-4}	-0.15	20.05
Nylon	2×10^{-7}	-1.9×10^{-4}	0.063	-6.76

Fig. 9 Equations of mass loss with temperature

Fig. 10 FEM modeling of concrete

4.2 콘크리트 내부온도분포 및 섬유 기화량

해석은 외부열원의 영향에 의한 비정상 온도분포해석 (nonlinear transient heat flow analysis)을 실시하였으며 Fig. 10에 콘크리트 시험체의 유한요소 모델링 개요를 나타냈다. 시험체에 대한 온도시간의존 열적 특성은 온도 함수로 치환하여 이를 고려하였으며, 해석방법에 대한 신뢰성 확보를 위하여 수행된 내화시험 결과를 이용하여 이를 검증하였다. 시험체의 열전달해석은 유한요소해석 프로그램인 Midas FEA를 이용하였으며, 열전달 해석 시 재료의 열정수 값은 EN 1992-1-2:2004(E)의 값을 활용하였다. 열전도율 값은 시간의존함수인 upper limit 값으로 설정하였고 비열 및 열확산률은 함수율 3% 조건으로서, 사용된 다음과 같은 식 (2), (3)에 의하여 그 값을 활용하였다. Fig. 11은 온도분포 해석 결과를 나타낸 것으로 시간의 흐름에 따라 내부온도가 동심원 형태로 전달되는 것으로 나타났으며, Fig. 12에 콘크리트 내부에 매립된 온도센서를 통해 측정된 실험값과 온도 해석값의 비교를 나타냈다. 해석 결과는 실험값과 약간 차이는 나타나고 있으나, 폭렬이 발생되는 5~30분 사이의 온도분포해석에 따른 섬유 기화량의 산정에는 큰 영향이 없을 것으로 판단되었다. 가열시 온도분포에 따른 섬유의 용융량의 산정을 위해서 다음과 같은 가정을 전제로 하였다.

- ① 실제 시험체의 온도분포는 해석조건과 동일하다.
- ② 섬유는 시험체내에 균등하게 분포한다.
- ③ 섬유의 기화량은 식 (1)로 계산한다.

또한 섬유의 기화량에 따른 폭렬 저감의 영향을 분석하기 위해 Fig. 13과 같이 표면에서의 깊이 10 mm, 30 mm, 50 mm로 설정하였으며, 각각의 면적률을 계산하면 전체 면적의 36%, 48%, 16%로 된다. 섬유의 분산 또한 균등분포로 산정하였기 때문에 섬유율은 면적률로 산정하였다. 설정된 표면에서의 거리에 따른 온도분포는 시간의존성을 갖기 때문에 폭렬발생 시간인 30분 이내에 5, 10, 15, 20, 30분으로 분석하였으며, 온도영역의 설정은 섬유의 녹는점을 고려하여 300°C 이하, 300°C~400°C, 400°C~500°C, 500°C 이상으로 설정하였고 각각의 온도점유율을 산정하였다. 각각의 시간에 따른 온도분포별 면적률을 Fig. 14에, 설정된 영역에 있어서 시간에 따른 섬유 기화율은 식 (4)에 의해 계산하였다.

Fig. 11 Temperature history in concrete

Fig. 12 Comparison experiment with analysis

Fig. 13 Calculated method of temperature area at distance

$$R_p = F_r \times A_r \times F_m \times (A_{300-400} + A_{400-500} + A_{500}) \quad (4)$$

여기서, R_p : total fiber loss at distance (vol%)

F_r : ratio of fiber volume mixed (vol%)

A_r : ratio of area at distance (%)

F_m : calculated fiber loss at distance (%)

$A_{300-400}$: ratio of area 300°C to 400°C (%)

$A_{400-500}$: ratio of area 400°C to 500°C (%)

A_{500} : ratio of area over 500°C (%)

Fig. 15는 가열시 섬유 종류에 따라 손실되는 섬유 손실률을 나타낸 것으로 표면거리 10 mm까지는 나일론섬유를 혼입한 콘크리트의 경우 섬유 기화량이 PP섬유를 혼입하는 콘크리트에 비하여 초기 시점인 5~10분 사이

Fig. 14 Temperature distribution area with heating

(a) Fiber 0.15vol% mixed of concrete

(b) Fiber 0.25vol% mixed of concrete

Fig. 15 Mass loss of fiber with fiber type

에서 섬유의 기화량이 크고 그 값은 0.012vol% 이상으로 확인되었다. 10~20분 사이에서는 PP섬유를 혼입한 경우에 비하여 작지만 20분 이상의 시간에서는 유사한 거동을 하는 것으로 확인되었다. 표면거리 10 mm 이상의 거리에서는 약간의 차이는 발생하였지만 섬유종류에 따른 크게 나타나지 않는 것으로 분석되었다.

또한 혼입률이 증가하는 경우는 이러한 경향의 차이가 크게 발생하였으며, Fig. 16에 나타난 바와 같이 혼입률이 증가함에 따라 표면거리 10 mm의 섬유용융 및 기화에 따른 섬유 손실률의 차이가 표면거리 30 mm, 50 mm에서의 값에 비하여 그 영향이 큰 것으로 확인되었다. 또한 전체적인 섬유 손실량은 30분 이상의 온도가 되면 최소 전체섬유의 약 60% 이상이므로 그 이상의 온도에서는 수증기압을 배출 및 이동할 수 있는 충분한 공극이 형성되어 수증기압이 유지되는 것으로 판단된다. 따라서 실험 결과에서 폭발 실험 결과, 공극압의 관계, 섬유의 기화량의 분석에 따른 해석 결과 값을 정리해보면 빠른 시간에 가열되는 콘크리트의 경우 급격한 온도상승에 따라 섬유의 용융점에 차이가 있더라도 초고강도 콘크리트의 영역에서는 초기 기화에 따른 손실량의 차이가 폭발의 저감시키는데 효과가 있는 것으로 확인되었다.

(a) Nylon fiber

(b) Polypropylene fiber

Fig. 16 Mass loss of fiber with fiber mixed volume

또한 PE섬유의 경우에는 용융점이 PP섬유 이하이지만 직경이 매우 작고, PP섬유와 같이 300°C 이상의 온도에서 섬유의 기화량이 급격하게 상승되는 현상이 발생하지 않아 초고강도 콘크리트의 폭렬 저감에는 효과가 없을 것으로 판단되었다.

5. 결 론

유기섬유의 용융 및 기화특성에 따른 초고강도 콘크리트의 폭렬 특성 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 선행연구를 바탕으로 섬유의 용융점에 따른 초고강도의 폭렬 특성을 평가한 결과, 용융점이 낮은 섬유도 초기에 폭렬이 발생할 수 있고 섬유 혼입률을 증가시키더라도 박리폭렬과 같은 현상이 나타나 섬유의 초기 용융 및 기화에 따른 상세 분석이 필요하다. 또한 폭렬이 방지되더라도 열팽창변형이 증대되는 현상이 발생됨에 따라 장기가열시 열응력에 의한 영향도 고려해야 한다.
- 2) 섬유혼입에 따른 수증기 팽창압을 패턴을 파괴 폭렬, 부분 폭렬, 폭렬이 발생하지 않는 단계로 구분하여 평가하였고, 섬유혼입에 따라 표면부에 가깝게 형성되는 수증기 팽창압이 콘크리트 내부로 이동하는 것으로 나타났다. 또한 동일 혼입률 조건에서 나일론 및 PP섬유의 수증기 팽창압은 유사한 수준으로써, 나일론섬유는 10~20분, PP섬유는 20분 이상의 가열조건에서 영향성이 큰 것으로 확인되었다.
- 3) 섬유의 용융 및 기화에 따른 공극의 형성에 있어서 PE 및 PP섬유의 경우는 용융점은 낮지만 실제로 섬유가 녹아서 기화되는 시점이 높고, 섬유의 100°C~300°C의 사이에서 중량이 상승되어 공극의 폐쇄현상으로 혼입률이 증가되어도 초기 폭렬 방지에는 어려울 수 있다. 그러나 나일론섬유의 경우 용융점은 높지만 100°C~400°C 사이에서 전체 섬유량의 약 3%로 정도로서 초기에 형성되는 공극으로 인하여 타 섬유에 비하여 폭렬의 방지가 효과적임을 확인할 수 있었다.
- 4) 콘크리트 내부 온도분포에 따른 섬유 기화량의 분석 결과, 혼입률이 증가함에 따라 표면거리 10 mm의 섬유용융 및 기화에 따른 섬유 손실률의 차이가 표면거리 30 mm, 50 mm에서의 값에 비하여 그 영향이 큰 것으로 확인되었다. 또한 전체적인 섬유의 기화량은 30분 이상의 온도가 되면 최소 전체섬유의 약 60% 이상이므로 그 이상의 온도에서는 수증기압을 배출 및 이동할 수 있는 충분한 공극이 형성되어 수증기압이 유지되는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원

(09 첨단도시A01)과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No.2010-0014723)이며, 연구자의 일부는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Kalifa, P., Menneteau, F. D., and Quenard, D., "Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 12, 2000, pp. 1915~1927.
2. 류동우, "콘크리트중의 열수분 동시이동을 고려한 수분 분포 예측모델," 대한건축학회 논문집(구조계), 25권, 6호, 2009, pp. 115~122.
3. 송훈, 형원길, 도정운, 소양섭, "고강도 실리카폼 콘크리트의 압축강도와 함수율에 따른 폭렬 성상," 대한건축학회 논문집(구조계), 20권, 9호, 2004, pp. 111~117.
4. Ko, J. W., Ryu, D. W., and Noguchi, T., "The Spalling Mechanism of High-Strength Concrete under Fire," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 63, No. 5, 2011, pp. 357~370.
5. Hertz, K. D., "Limits of Spalling of Fire-Exposed Concrete," *Fire Safety Journal*, Vol. 38, No. 2, 2003, pp. 103~116.
6. Fu, Y. and Li, L., "Study on Mechanism of Thermal Spalling in Concrete Exposed to Elevated Temperature," *Materials and Structures*, Vol. 44, No. 1, 2011, pp. 361~376.
7. Phan, L. T., "High-Strength Concrete at High Temperature-An Overview," *Utilization of High Strength/High Performance Concrete, 6th International Symposium, Proceedings*, Vol. 1, 2002, pp. 501~518.
8. Anderberg, Y., Fire Safety Design, "Spalling Phenomena of HPC and OC," *NIST Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete*, 1997, pp. 1~5.
9. Kim, G. Y., Kim, Y. S., and Lee, T. G., "An Experimental Study on the Explosive Spalling Properties of High Strength Concrete with Contents of Fiber and Prestressed," *9th International Symposium on fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-9)*, Sydney Australia, 2009, pp. 128~133.
10. 한천구, 한민철, 김원기, 이주선, "고강도 콘크리트의 폭렬방지에 미치는 혼화재 및 PP 섬유의 영향," 대한건축학회 논문집(구조계), 25권, 11호, 2009, pp. 105~111.
11. 한천구, 양성환, 한민철, 송용원, "PP와 NY섬유의 형상비 및 혼입률 변화에 따른 고강도 콘크리트의 폭렬방지 특성," 대한건축학회 논문집(구조계), 24권, 7호, 2008, pp. 69~76.
12. Zeiml, M., Leithner, D., Lackner, R., and Mang, H. A., "How to Polypropylene Fibers Improve the Spalling Behavior of in-Situ Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 5, 2006, pp. 929~942.
13. 김영선, "섬유를 혼입한 고강도 철근콘크리트 기둥의 내화특성 평가에 관한 연구," 충남대학교 학위청구논문, 박사학위, 2010, pp. 95~105.
14. 원종필, 장창일, 김홍열, 김완영, "폴리프로필렌섬유 혼입률에 따른 고강도콘크리트 기둥부재의 폭렬 및 내부 온도 분포특성," 콘크리트학회 논문집, 20권, 6호, 2008, pp. 821~826.
15. Kalifa, P., Chn, G., and Gall, C., "High-Temperature Behav-

our of HPC with Polypropylene Fibres from Spalling to Microstructure,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 10, 2001, pp. 1487~1499.

2: Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1-2: Structural Fire Design, CEN/TC 250/SC 2, 1993, pp. 59~62.

16. Comite Europeen de Normalisation (CEN), prENV 1992-1-

요 약 최근 고강도 콘크리트의 폭발현상에 관한 메커니즘의 연구와 더불어 폭발을 방지하는 방법으로써 섬유혼입에 의한 콘크리트의 수증기압을 낮추는 방법이 선호되고 있는 실정이다. 주로 단일 형태의 폴리프로필렌 섬유를 혼입하여 폭발을 저감하는 방법들이 사용하고 있으나 초고강도 콘크리트 영역에서는 실제로 급격하게 온도가 상승하는 경우에 있어서 폭발 및 급격한 수증기 팽창압을 고려할 수 없다는 점을 들 수 있다. 따라서 이 연구에서는 콘크리트 내부온도상승조건에 따라 섬유의 용융점에 따른 공극의 형성 및 폭발의 상관성을 분석하고자 하였으며, W/B 12.5%의 초고강도 콘크리트를 대상으로 용융점이 다른 PE섬유, PP섬유, 나일론섬유를 각각 0.15vol%, 0.25vol% 혼입하여 폭발 성상, 수증기압, 시차열 중량 분석, 해석적 검토를 행하였다. 실험 결과, 동일 섬유 혼입률 조건에서 섬유의 용융점이 낮더라도 초고강도 콘크리트에서는 섬유의 기화에 의한 섬유의 중량손실이 발생하지 않으면 초기 폭발의 방지가 어렵고, 가열시간 10분 전후의 빠른 공극을 형성하는 섬유가 폭발의 방지에 효과적인 것으로 나타났다.

핵심용어 : 폭발 메커니즘, 폭발 저감, 수증기압, 용융점, 초기 폭발